

УДК 528.482

Оперативный геодезический контроль деформаций призабойной зоны при инновационных технологиях проходки туннелей

Д. А. Афонин, В. Н. Кавказский, А. А. Никитчин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Афонин Д. А., Кавказский В. Н., Никитчин А. А. Оперативный геодезический контроль деформаций призабойной зоны при инновационных технологиях проходки туннелей // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 432–443. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-432-443

Аннотация

Цель: Рассмотреть вопрос выполнения оперативного контроля деформаций призабойной зоны тоннеля с использованием технологии наземного лазерного сканирования при проходке тоннеля новоавстрийским методом туннелирования, который является наиболее прогрессивным и экономически целесообразным методом строительства подземных сооружений горным способом. Сущность этого метода заключается в том, что в качестве крепи призабойной зоны тоннеля используется самонесущая оболочка из набрызг-бетона без использования традиционных методов крепления, что позволяет существенно экономить время на проходку тоннелей, особенно имеющих сложную геометрию и нестандартные габариты. При этом концептуальной основой данного метода является необходимость оперативного выявления деформаций грунтового массива призабойной зоны, обоснованная необходимостью обеспечения безопасности ведения работ. **Методы:** В качестве основного метода определения геопространственного положения призабойной зоны тоннеля предложено рассмотреть технологию наземного лазерного сканирования. Обработка результатов сканирования выполнена в специализированном программном комплексе Leica Cyclone 3DR. **Результаты:** Рассмотрен существующий опыт геодезического контроля деформаций в туннелировании новоавстрийским методом. Представлены результаты обработки данных наземного лазерного сканирования отдельного фрагмента тоннеля, получена его математическая трехмерная модель, и выполнена оценка отклонений фактической поверхности тоннеля от полученной теоретической поверхности. **Практическая значимость:** Полученная трехмерная модель может быть в дальнейшем использована для геодезического контроля деформаций. Обоснованы теоретические основы оценки требуемой точности определения деформационных характеристик, которые базируются на переходе от строительных допусков к средним квадратическим погрешностям определения деформационных характеристик и затем к средним квадратическим погрешностям координат точек лазерного сканирования. Определены укрупненные этапы сканирования с учетом технологии проходки тоннелей новоавстрийским методом.

Ключевые слова: Новоавстрийский метод туннелирования, геодезический контроль деформаций, призабойная зона тоннеля, наземное лазерное сканирование, трехмерная модель.

Введение

Новоавстрийский метод туннелирования (NATM) сегодня является одним из ведущих направлений туннелестроения, так как имеет ряд существенных технических и экономических преимуществ по сравнению с другими традиционными методами проходки тоннелей, а именно: возможность возводить подземные сооружения любой формы и размеров поперечного сечения в сложных инженерно-геологических условиях, в том числе и в слабых грунтах; значительное уменьшение стоимости и времени строительства за счет использования самонесущей конструкции обделки, которая выполняется из набрызг-бетона с применением композитных материалов, без установки усиливающих элементов (арок и анкеров).

Первые упоминания о методе NATM относятся к 1964 г. [1]. За последние тридцать лет активного внедрения реализовано более 250 проектов в подземном строительстве как на объектах транспортной инфраструктуры, гидроэнергетики, городских коммуникаций. Гибкость технологии к конкретным инженерно-геологическим и градостроительным условиям позволила реализовывать различные подходы к реализации проектов, что породило значительное количество новых названий [2], таких как напыляемая бетонная обделка (SCL), метод последовательной выемки грунта (SEM), CD-NATM, центральная разделительная стенка NATM, CDM, метод центральной диафрагмы или CRD-NATM, метод Cross Diaphragm и UHVS, метод ADECO RS, который использует технологию нанесения набрызг-бетона, в туннелестроении позиционируется как новый метод и противопоставляется NATM. Подробные определения NATM доступны в литературе и с описанием исторических предпосылок обсуждаются в статье [2]. На территории Российской Федерации NATM/SCL, ADECO RS применялись дважды при реализации транспортных объектов: первый объект — четырехполосный

двухсекционный автодорожный тоннель протяженностью 1,25 км через р. Уфу, второй объект на участке, начинающемся от 172 км федеральной дороги М-27 «Джубга».

К настоящему времени сформировалась концепция использования метода NATM с набором ряда принципов [3], в основе которых лежит идея управления горным давлением посредством изучения поведения горных пород под нагрузкой и их мониторинга во время всего технологического процесса подземного строительства. Другими словами, метод NATM — это не только набор из конкретных операций и вспомогательных технологий, обеспечивающих оптимальную поддержку выработки, а сложный процесс, основанный на изучении начального поля напряжений в конкретных геологических условиях и на наблюдениях конвергенции (сближение контура горной выработки) и дивергенции (линейные деформации лба забоя). В такой идеологии одним из главных принципов является контроль деформаций грунтового массива как в горной выработке, так и на земной поверхности, и выполняемый как геодезическими методами, так и на основе использования геотехнических датчиков (тензометры, инклинометры). Развитие этот принцип получил после обрушения в тоннеле аэропорта Хитроу в 1994 г., в настоящее время метод NATM в соответствии с жесткими правилами охраны труда и безопасности не допускает присутствия людей в забое, все работы, в том числе и мониторинг деформаций, выполняются удаленно (на расстоянии) за счет автоматизации процессов [4].

В данной статье рассматривается оперативный геодезический контроль деформаций призабойной зоны тоннеля, сооружаемого методом NATM. Оперативность контроля деформаций означает, что выполнение измерений, их математическая обработка с определением деформационных характеристик и анализ деформаций грунтового массива должны осуществляться

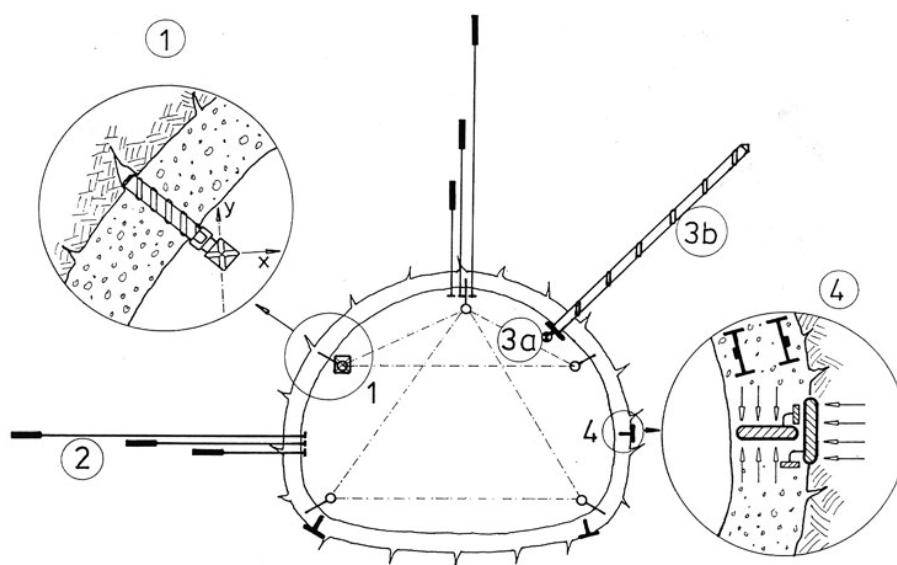


Рис. 1. Пример тоннелеизмерительного оборудования NATM:
1 — геодезическая марка, 2 — тензомер, 3 — полная анкерная сила,
4 — динамометрические датчики

непосредственно на станции наблюдений — идея немедленного получения результатов наблюдений для повышения безопасности строительства. В настоящее время такой подход реализуется в мировой практике. Так, в 2004 г. компаниями BeMo Tunnelling и Morgan Sindall была разработана система Tunnel Beamer™, которая представляет собой систему управления и съемки в режиме реального времени с оперативным получением информации о деформациях и их визуализацией [5].

Методы исследования

Выполнив анализ материалов, посвященных методу NATM и системе Tunnel Beamer™ [6–12], авторы пришли к выводу, что геометрия забоя тоннеля геодезическими методами контролируется электронными тахеометрами точно по специальным закрепленным целям (рис. 1, 2) или в безотражательном режиме. Расстояние между контрольными измерительными профилями может варьироваться от 3 до 50 м и зависит от геотехнических условий строительства [11].



Рис. 2. Геодезическая марка, закрепленная в набрызг-бетоне

В каждом цикле измерений определяются трехмерные координаты контрольных точек сечения (рис. 3). Данные геодезических измерений передаются на компьютер, который содержит информацию о проектной 3D-геометрии тоннеля и результаты предыдущего цикла измерений, тут же определяются горизонтальные и вертикаль-

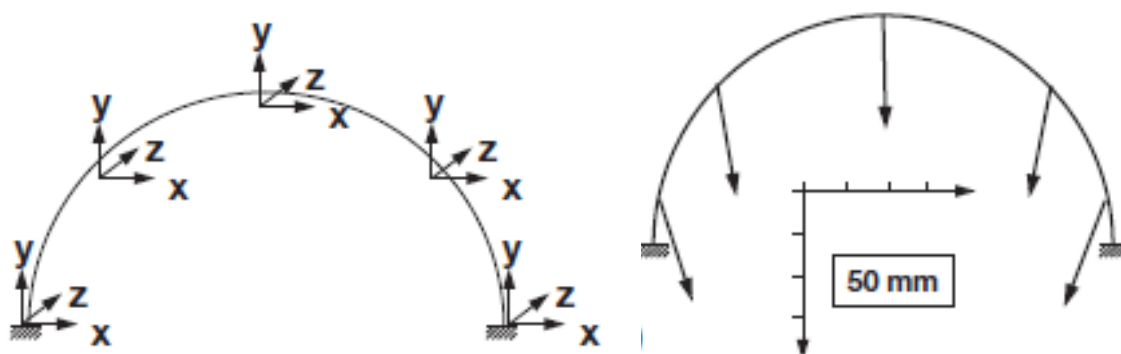


Рис. 3. Пространственные координаты контрольных точек (слева), вектора смещения (справа)

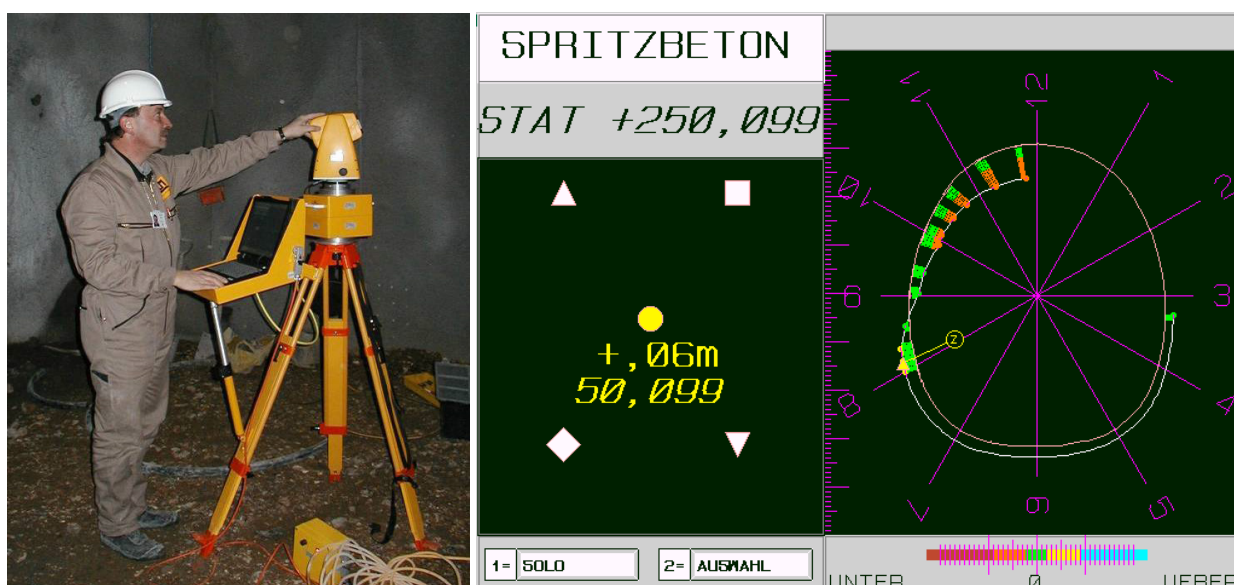


Рис. 4. Система Tunnel Beamer

ные смещения контрольных точек тоннеля [12]. Сравнение теоретического и фактического положения забоя тоннеля визуализируется на компьютере (рис. 4).

Прорывным направлением стало использование технологии NATM в исторических центрах больших городов. Например, развитие технологий строительства тоннелей, особенно тоннелей метро, сталкивается со сложными задачами, требующими оперативного применения решений по сохранности памятников всемирного наследия, жесткими требованиями контроля за осадками дневной поверхности, сжатыми сроками строительства в условиях жесткой бюджетной поли-

тики и конкуренции. Например, теоретические исследования по обоснованию целесообразности применения новых технологий при сооружении односводчатой станции из монолитного железобетона в условиях Санкт-Петербурга показали, что напряженно-деформированное состояние сегодняшние методы расчета позволяют с достаточной точностью спрогнозировать конструктивные технологические параметры (рис. 5). Однако теоретические исследования не позволяют учесть все производственные нюансы и геологические особенности, и в этом случае целесообразно использовать методы оперативного контроля в процессе строительства.

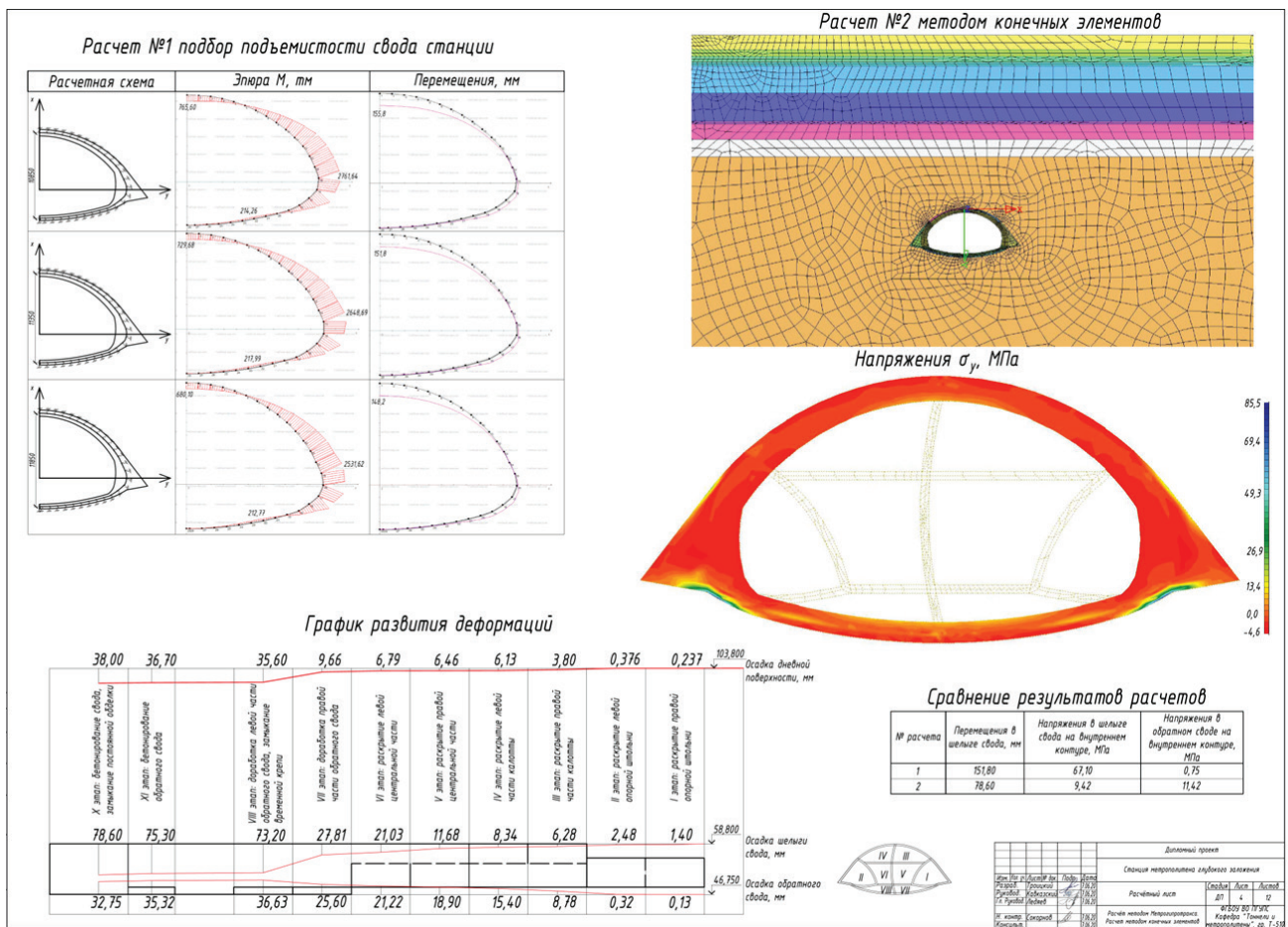


Рис. 5. Результаты теоретических исследований односводчатой станции из монолитного железобетона

В последние годы в практику ведения деформационного контроля различных инженерных сооружений широко внедряется технология наземного лазерного сканирования (НЛС). Поэтому предлагается рассмотреть данный концептуальный подход оперативного контроля призабойной зоны тоннеля, сооружаемого методом NATM, на основе технологии наземного лазерного сканирования (НЛС). Преимущество НЛС будет заключаться в том, что анализ деформаций можно будет выполнять не по дискретным данным, а с использованием трехмерной модели забоя тоннеля. Сегодня НЛС широко используется в инженерно-геодезическом производстве

[13–15], в том числе и для определения деформаций тоннеля [16–18].

Важным критерием выполнения любых геодезических работ являются требования к точности геодезических измерений.

Среди главных факторов, влияющих на точность и качество лазерного сканирования, большинство специалистов выделяют следующие основные факторы: точность прибора (калибровка); условия сканирования (атмосферные факторы); свойства объекта сканирования (отражательная способность); геометрия сканирования; расположение опорных точек; предварительная обработка материалов сканирования.

Координаты точек объекта в системе координат НЛС вычисляются по известным формулам:

$$\left. \begin{aligned} |X &= S \cos \varphi \sin z \\ |X &= S \sin \varphi \sin z \\ |Z &= S \cos z \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где S — измеренная дальность;

φ — горизонтальный угол измеренного направления;

z — вертикальный угол измеренного направления.

Следовательно, средние квадратические погрешности (СКП) определения координат точек сканирования зависят не только от линейно-угловой точности сканера, но и измеряемого расстояния.

Также точность измерения расстояний лазерным сканером зависит от угла падения лазерного луча на объект, чем ближе угол падения к предельному значению, тем грубее измерения.

Обоснование точности определения деформаций должно базироваться на переходе от допустимых величин деформаций (требования строительных норм) к СКП измерения данных деформаций, с учетом обеспечения несоизмеримости величины деформации с ошибками ее определения. В данном случае исходная точность может быть определена исходя из решения двух задач деформационных измерений, возникающих в практике: выявления аварийной ситуации, когда деформация может достигнуть заданной предельной величины, и последовательного во времени описания самого процесса протекания деформации.

При обосновании требуемой точности определения деформаций с точки зрения выявления аварийной ситуации целесообразно потребовать, чтобы средняя квадратическая погрешность (СКП) определения предельной величины деформации не превосходила:

$$m_{\Phi} \leq \frac{\Phi_{\text{пр}}}{2t}, \quad (2)$$

где $\Phi_{\text{пр}}$ — предельная величина деформации,
 t — нормированный множитель, принимаемый обычно 2, 2,5 или 3.

Горизонтальное смещение отдельной точки сканирования можно выразить следующим образом:

$$m_{\Phi}^2 = m_{x,y,z(0)}^2 + m_{x,y,z(i)}^2, \quad (3)$$

где $m_{x,y,z(0)}$ и $m_{x,y,z(i)}$ — СКП определения положения точки сканирования соответственно в начальном (0) и любом другом (i) цикле измерений.

При сохранении идентичности схемы измерений СКП определения положения точек сканирования в двух циклах можно считать одинаковыми, тогда:

$$m_{x,y,z} = \frac{m_{\Phi}}{\sqrt{2}}. \quad (4)$$

Предельная величина деформаций рассчитывается на основе геотехнического прогноза деформаций. Так, максимальное расчетное значение деформации свода тоннеля при строительстве терминала 5 Лондонского аэропорта *Heathrow* составило 35 мм [7]. Тогда $m_{\Phi} \approx 9$ мм, а $m_{x,y,z} \approx 6$ мм.

Измерения со СКП, определенной по предельной величине деформации, позволяют зафиксировать лишь факт превышения деформации предельного значения. В этом случае суждение о критической величине деформации может оказаться запоздалым. Поэтому во втором случае при назначении точности измерений исходят из величины скорости деформаций V_{Φ} :

$$m_{V_{\Phi}} \leq \frac{V_{\Phi}}{2t}, \quad (5)$$

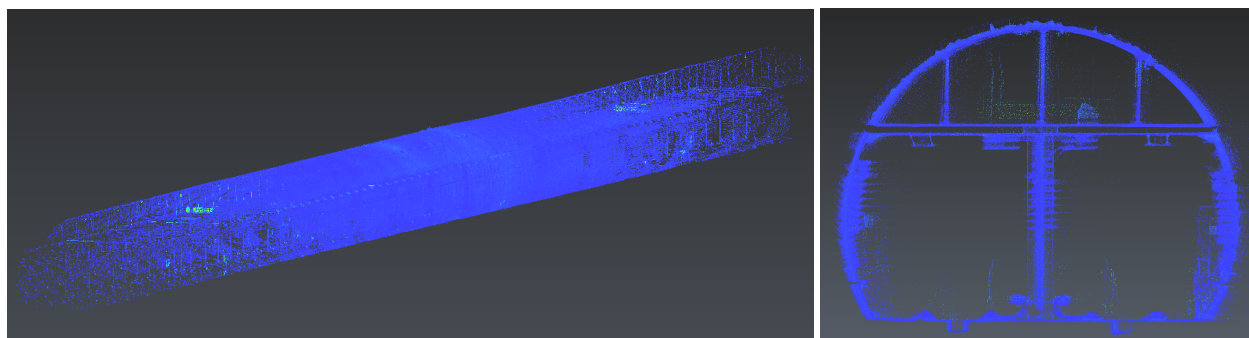


Рис. 6. Результаты лазерного сканирования тоннеля (облако точек)

где V_{ϕ} — скорость деформации, которая устанавливается в ходе геотехнического прогноза деформаций.

В случае геодезического контроля деформаций призабойной зоны тоннеля, сооружаемого методом NATM, и учитывая повышенные требования к безопасности работ на всем протяжении строительства, при обосновании СКП определения деформаций следует исходить именно из ожидаемой величины скорости деформаций. Такой контроль называют еще активным контролем.

С учетом технологии проходки тоннеля методом NATM можно выделить следующие укрупненные этапы выполнения НЛС:

- сканирование поверхности выработки (обнаженного породного контура);
- сканирование начального слоя набрызг-бетона толщиной 75 мм;
- сканирование структурного слоя набрызг-бетона толщиной 200–250 мм;
- сканирование финишного слоя набрызг-бетона толщиной 50 мм.

Такая схема сканирования позволит оценить объемы выемки грунта, минимальные толщины всех слоев набрызг-бетона и получить окончательный профиль тоннеля.

Активный контроль деформаций набрызг-бетона проводят в раннем возрасте увеличения прочности бетона — в течение 1 часа, через 3 часа и 6 часов после завершения распыления.

Если в случае с дискретными геодезическими измерениями результатом представления фактической геометрии тоннеля является профили (рис. 4), то результатом сканирования будет являться поверхность. Это позволит обнаруживать деформации на всей поверхности объекта.

Результаты

На рис. 6–9 представлены результаты обработки данных сканирования тоннеля цилиндрического сечения, которое мы выполнили в программе Leica Cyclone 3DR. На рис. 6 показано объединенное облако точек некоторого множества сканерных станций. Регистрация разных позиций сканирования в единую систему координат осуществлена по известным координатам опорных точек, которые закреплены черно-белыми мишенями. С каждой станции сканирования видно не менее трех опорных точек.

Как видно, данные сканирования содержат большое количество шумов, отсканированные препятствия (кабельные линии, болтовые соединения, техническая оснастка тоннелей и др.) подлежат исключению из облака точек. Поэтому на первом этапе обработки выполнили чистку и сегментацию в рамках некоторой ограниченной области (рис. 7). Таким образом, количество точек сократилось с 12 млн точек до 237 тыс. точек.

На следующем этапе по полученному набору облака точек выполнено построение 3D-сетки и



Рис. 7. Результаты чистки и сегментации облака точек (слева направо)

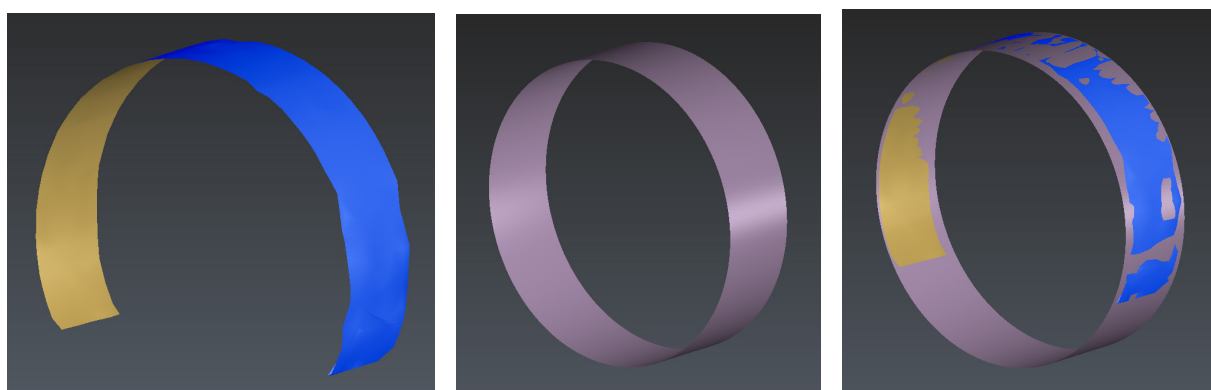


Рис. 8. Результаты моделирования наилучшего цилиндра (слева 3D-сетка, в центре — лучший цилиндр, справа — результаты их совмещения)

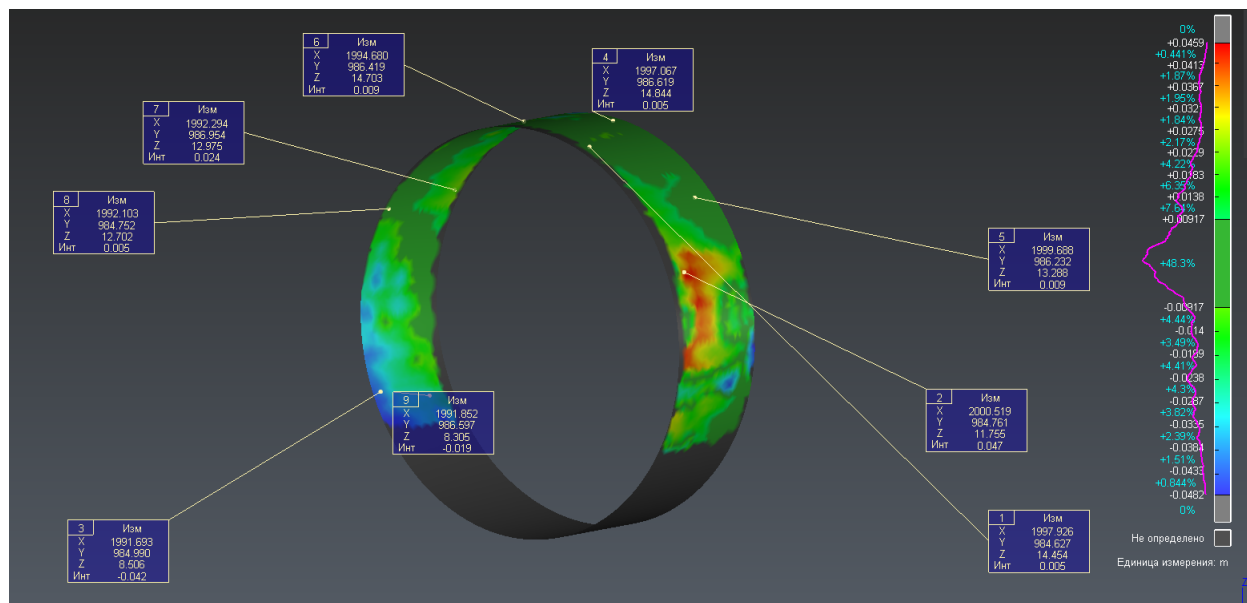


Рис. 9. Сравнение фактической поверхности и лучшего цилиндра

моделирование наилучшего цилиндра переменного диаметра (рис. 8). Эта задача решается итерационным способом. В рамках каждого приближения облако точек сравнивается с поверхностью наилучшего цилиндра, определяется статистический значимый диапазон отступа точек облака от поверхности цилиндра и точки, выходящие за этот диапазон, удаляются из облака. Диаметр лучшего цилиндра, полученного представленным способом, сравнили с теоретическим значением, расхождение составило первые мм.

Анализ результатов

На заключительном этапе выполнен анализ отклонений фактической поверхности от лучшего цилиндра (рис. 9).

В статьях [16, 18, 19] также представлены алгоритмы и результаты обработки облака точек лазерного сканирования тоннеля для получения геометрии его поперечного профиля. При этом на рис. 8 видно, что отклонения точек облака от поверхности цилиндра в некоторых частях составляет около ± 4 см, а отклонения большинства точек лежат в диапазоне ± 1 см. Значит, возможно выполнить следующий итерационный шаг, наилучший цилиндр строится уже по уточненному облаку точек и так далее, пока отступы точек облака от поверхности цилиндра не будут меньше предельной погрешности определения их положения, см. формулы (2) — (5).

Заключение

Таким образом, данные НЛС эффективны для полного анализа фактического пространственного положения области забоя и его изменения во времени. Традиционно исследования деформаций основаны на данных смещения, полученных с использованием обычных геодезических и геотехнических методов. Эти методы, несмотря на это, могут обнаруживать очень тонкие (миллиметровый уровень) смещения; они измеряют смеще-

ния ограниченного количества точек. Напротив, лазерное сканирование лучше всего подходит для измерений по областям, но обеспечивает меньшую точность. НЛС может улучшить понимание поведения горной массы, поскольку она позволяет отображать смещения по площади, а не в определенных точках. Однако применимость и эффективность метода в значительной степени зависит от плотности и качества данных сканирования, используемой техники обработки и индивидуальных характеристик, которые определяют физическое явление в каждом конкретном случае.

В целом современные системы наземного лазерного сканирования достаточно надежны для использования в подземной среде. Лазерное сканирование следует рассматривать не как альтернативу традиционным методам измерений, а как дополнение к хорошо зарекомендовавшим себя методам геодезической инженерии.

Направление будущих исследований в этой области — исследование автоматизации обработки данных НЛС с целью получения результатов сканирования и их анализа сразу в процессе работ.

Библиографический список

1. URL: https://www.academia.edu/9427931/B_Year_Innovation_Project_Illustration.
2. Karakus M. FEM analysis for the effects of the natm construction technique on settlement above shallow soft ground tunnels / M. Karakus, R. J. Fowell. — https://www.researchgate.net/publication/258113737_FEM_analysis_for_the_effects_of_the_NATM_construction_technique_on_settlement_above_shallow_soft_ground_tunnels.
3. Karakus M. An insight into the New Austrian Tunnelling Method (NATM) / M. Karakus, R. J. Fowell // The 7th Regional Rock Mechanics Symposium, Sivas. — Vol.: Sivas, Turkey.
4. Chapman D. N. Introduction to tunnel construction / D. N. Chapman, N. Metje, A. Stärk. — DOI:10.1201/9781315273495.
5. URL: <https://cecl.global/project/tunnelbeamer/>.

6. URL: <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/33268/21-Kozerema.pdf?sequence=1>.
7. URL: <https://www.ita-aites.cz/files/tunel/2005/4/tunel-0504-4.pdf>.
8. Trigger Values for tunnel monitoring in SCL shallow tunnels. — URL: <https://diglib.tugraz.at/download.php?id=58e2cacdc3ec7&location=browse>.
9. The Laser-Distometer: a newer, better way to measure tunnel deformations. — URL: <https://cgs.ca/pdf/GeoTechNews/2014/GIN%203201.pdf>.
10. Hilar M. Evaluation of innovative sprayed-concrete-lined tunneling / M. Hilar, A. Thomas, Y. S. Hsu, B. Jones // ICE Proceedings Geotechnical Engineering. — № 161(3). — Pp. 137–149. — DOI: 10.1680/geng.2008.161.3.137.
11. NATM / SEM From Design to Construction. — URL: <https://tunnelingshortcourse.com/2016-presentations/gallery-natm-design-construction.pdf>.
12. Health and safety, and risk management in tunneling. — URL: <http://faculty.tafreshu.ac.ir/file/download/course/1583686541-introduction-to-tunnel-construction-part-3-of-3.pdf>.
13. Kanashin N. V. Application of laser scanning technology in geotechnical works on reconstruction of draw spans of the Palace Bridge in Saint Petersburg / N. V. Kanashin, A. A. Nikitchin, E. S. Svintsov // Procedia Engineering. — 2017. № 189. — Pp. 393–397. — DOI:10.1016/j.pro-eng.2017.05.062.
14. Bogomolova N. Laser scanning application possibilities in the engineering structures survey / N. Bogomolova, A. Nikitchin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2019. — № 698(4). — DOI: 10.1088/1757-899X/698/4/044011.
15. Romanovich M. Using the laser scanning method in the reconstruction of metro stations / M. Romanovich, M. Kuzmenkova, V. Breskich, K. Kulakov // Transportation Research Procedia. — 2021. — № 54. Pp. 819–826. — DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.135.
16. Nuttens T. Ovalisation measurements of newly built concrete tunnels by means of terrestrial laser scanning / T. Nuttens, A. De Wulf, C. Stal et al. // Conference Paper. June 2011. — DOI: 10.5593/sgem2011/s07.112.
17. Nuttens T. High Resolution Terrestrial Laser Scanning for Tunnel Deformation Measurements / T. Nuttens, A. De Wulf, L. Bral // Conference: FIG Congress 2010 — Facing the Challenges-Building the Capacity. Sydney, Australia.
18. Gikas V. Three-Dimensional Laser Scanning for Geometry Documentation and Construction Management of Highway Tunnels during Excavation / V. Gikas // Sensors. — 2012. — № 12. — Pp. 11249–11270. — DOI:10.3390/s120811249.
19. Arastounia M. Automated As-Built Model Generation of Subway Tunnels from Mobile LiDAR Data / M. Arastounia // Sensors. — № 16(9). P. 1486. — DOI: 10.3390/s16091486.

Дата поступления: 20.05.2022

Решение о публикации: 01.08.2022

Контактная информация:

АФОНИН Дмитрий Андреевич — канд. техн. наук,
доц.; afonin83@yandex.ru

КАВКАЗСКИЙ Владимир Николаевич — канд. техн.
наук, доц.; kavkazskiy_vn@mail.ru

НИКИТЧИН Андрей Андреевич — канд. техн. наук,
доц.; anikitchin@gmail.com

Operational Geodetic Check of Bottom-Hole Zone Deformations at Innovative Tunneling Technologies

D. A. Afonin, V. N. Kavkazskiy, A. A. Nikitchin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Afonin D. A., Kavkazskiy V. N., Nikitchin A. A. Operational Geodetic Check of Bottom-Hole Zone Deformations at Innovative Tunneling Technologies // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 432–443. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-432-443

Summary

Purpose: To consider the issue on performance of operational control of deformations of tunnel bottomhole zone with the use of ground-based laser scanning technology when tunneling with New Austrian tunneling method which is the most progressive one and feasible in economics terms for underground building construction by mining. The essence of this method is in that as a support for tunnel bottom-hole zone, a self-supporting shell made of sprayed concrete without traditional fastening method usage is applied that allows to save time for tunneling significantly, especially of those tunnels which have complex geometry and non-standard dimensions. At the same, the conceptual basis for this method is the necessity to identify operatively bottom-hole zone soil mass deformations that's justified by the need to provide job realization safety. **Methods:** As a major method for to determine tunnel bottomhole zone geospatial position it is proposed to consider ground-based laser scanning technology. Scanning result processing was implemented in specialized software package Leica Cyclone 3DR. **Results:** Existing experience of geodetic check of deformations in tunneling by New Austrian method is considered. Processing results for data on ground laser scanning of a tunnel separate fragment are presented, a tunnel mathematical three-dimensional model is obtained and assessment of deviations of tunnel actual surface from obtained theoretical one is fulfilled. **Practical significance:** The obtained three-dimensional model can be further used for geodetic monitoring of deformations. Theoretical bases for estimation required accuracy for deformation characteristics definition are substantiated which are based on the transition from construction tolerances to average quadratic errors of deformation characteristics definition and then to average quadratic errors of coordinates for laser scanning points. The enlarged stages of scanning are defined with view of tunneling technology of New Austrian method.

Keywords: New Austrian tunneling method, geodesic deformation check, tunnel bottomhole zone, ground-based laser scanning, three-dimensional model.

References

1. Available at: https://www.academia.edu/9427931/B_Year_Innovation_Project_Illustration
2. Karakus M., Fowell R. J. FEM analysis for the effects of the natm construction technique on settlement above shallow soft ground tunnels. Available at: https://www.researchgate.net/publication/258113737_FEM_analysis_for_the_effects_of_the_NATM_construction_technique_on_settlement_above_shallow_soft_ground_tunnels.
3. Karakus M., Fowell R. J. An insight into the New Austrian Tunnelling Method (NATM). The 7th Regional Rock Mechanics Symposium, Sivas. Vol.: Sivas, Turkey.
4. Chapman D. N., Metje N., Stärk A. Introduction to tunnel construction. DOI: 10.1201/9781315273495
5. Available at: <https://cecl.global/project/tunnelbeamer/>
6. Available at: <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/33268/21-Kozerema.pdf?sequence=1>

7. Available at: <https://www.ita-aites.cz/files/tunel/2005/4/tunel-0504-4.pdf>
8. Trigger Values for tunnel monitoring in SCL shallow tunnels. Available at: <https://diglib.tugraz.at/download.php?id=58e2cacdc3ec7&location=browse>.
9. The Laser-Distometer: a newer, better way to measure tunnel deformations. Available at: <https://cgs.ca/pdf/GeoTechNews/2014/GIN%203201.pdf>
10. Hilar M., Thomas A., Hsu Y. S., Jones B. Evaluation of innovative sprayed-concrete-lined tunneling. ICE Proceedings Geotechnical Engineering. I. 161(3), pp. 137–149. DOI: 10.1680/geng.2008.161.3.137.
11. NATM. SEM From Design to Construction. Available at: <https://tunnelingshortcourse.com/2016-presentations/gall-natm-design-construction.pdf>.
12. Health and safety, and risk management in tunneling. Available at: <http://faculty.tafreshu.ac.ir/file/download/course/1583686541-introduction-to-tunnel-construction-part-3-of-3.pdf>.
13. Kanashin N. V., Nikitchin A. A., Svintsov E. S. Application of laser scanning technology in geotechnical works on reconstruction of draw spans of the Palace Bridge in Saint Petersburg. *Procedia Engineering*. 2017, I. 189, pp. 393–397. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.062.
14. Bogomolova N., Nikitchin A. Laser scanning application possibilities in the engineering structures survey. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, I. 698(4). DOI: 10.1088/1757-899X/698/4/044011.
15. Romanovich M., Kuzmenkova M., Breskich V., Kulakov K. Using the laser scanning method in the reconstruction of metro stations. *Transportation Research Procedia*. 2021, I. 54, pp. 819–826. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.135.
16. Nuttens T., Wulf A. De, Stal C., et al. Ovalisation measurements of newly built concrete tunnels by means of terrestrial laser scanning. Conference Paper. June 2011. DOI: 10.5593/sgem2011/s07.112.
17. Nuttens T., Wulf A. De, Bral L. High Resolution Terrestrial Laser Scanning for Tunnel Deformation Measurements. Conference: FIG Congress 2010 — Facing the Challenges-Building the Capacity. Sydney, Australia.
18. Gikas V. Three-Dimensional Laser Scanning for Geometry Documentation and Construction Management of Highway Tunnels during Excavation Sensors. 2012, I. 12, pp. 11249–11270. DOI:10.3390/s120811249.
19. Arastounia M. Automated As-Built Model Generation of Subway Tunnels from Mobile LiDAR Data. *Sensors*. I. 16(9), p. 1486. DOI: 10.3390/s16091486.

Received: May 20, 2022

Accepted: August 01, 2022

Author's information:

Dmitry A. AFONIN — PhD in Engineering, Associate Professor; afonin83@yandex.ru

Vladimir N. KAVKAZSKY — PhD in Engineering, Associate Professor; kavkazskiy_vn@mail.ru

Andrey A. NIKITCHIN — PhD in Engineering, Associate Professor; anikitchin@gmail.com